

## EL ACUEDUCTO DE ZARAGOZA

- **La ciudad y el agua**

Según publica José Carlos Abadía, ya el bronce de Botorrita, trata de un contencioso sobre el agua entre dos ciudades, *Alaún* (Alagón) y *Salduie* (Zaragoza, llamada entonces aún por su nombre vernáculo) constata la presencia de un canal que abastecía de agua a la primitiva ciudad.

La primitiva Zaragoza, situada en las márgenes del Huerva, junto al Ebro, apropiándose del agua del Jalón mediante una acequia, dejaba a la ciudad de *Alaún* sin el agua necesaria para regar sus tierras. (La del Ebro no podía usarla por estar a inferior cota) por lo que planteó un litigio que tuvo que dirimir el procónsul de la *Hispania Citerior* Cayo Valerio Flaco, el 15 de Mayo del año 87 a.C.

La zona donde se asienta la ciudad de Zaragoza se caracteriza por su extrema aridez, paradójicamente regada por uno de los ríos más caudalosos, río que sin embargo, debido a sus fuertes e imprevistas crecidas, lo hacían poco aconsejable para dedicarlo principalmente al riego. Además, el río pasa a una cota inferior a la necesaria para el riego de los campos adyacentes a la primitiva ciudad. Los caudales hidráulicos en esta zona se presentan siempre encajonados en el terreno, con las huertas en los bordes de los mismos.

Cuando se acometió la construcción de la ciudad romana, se le hizo un perímetro amurallado que era el mayor de *Hispania* (60 Ha.). Mayor que los de *Pompaelo* (19 Ha), *Uxama* (28 Ha), *Lucus Augusti* (34 Ha) e incluso *Emerita Augusta* (49 Ha) (**Abadía J.C.** *Algunas consideraciones sobre el abastecimiento de agua a Caesaraugusta*).

En cuanto al aprovisionamiento de agua, existía un problema. El Ebro, por una parte, presenta unas crecidas periódicas devastadoras, además, sus aguas arrastran gran cantidad de materia en suspensión, lo que lo hace poco aconsejable para el consumo humano, y el Huerva, por otro lado, aunque presenta el aprovisionamiento más fácil, pues bastaría con una simple presa, para que por gravedad fluyera el agua hasta la ciudad, sin embargo, plantea el inconveniente de su caudal altamente irregular, y el hecho de que al transcurrir por zonas semidesérticas, con escasa cubierta vegetal, las lluvias torrenciales que de forma imprevista descargan sobre el mismo, harían que arrastrase las presas o azudes que hubiera en su cauce, o bien las acabara atarquinando en un breve plazo, lo que las haría inútiles para el abastecimiento humano. La solución consistiría en traer el agua desde la orilla opuesta del río, del cauce del Gállego, que desemboca precisamente en las cercanías de la ciudad.

- **La traída de aguas a la ciudad**

Para llevar el agua a la ciudad, desde la orilla opuesta la Ebro, la única solución factible sería la construcción de un sifón que atravesara el río. La necesidad de construir asimismo un puente que permitiera el paso a la otra orilla de personas y carga, como ocurría en otras grandes ciudades que estaban junto a ríos importantes, como Córdoba y Mérida, hizo que se acometiera, dentro de la misma obra, la construcción de un puente y el *venter* del sifón.

Por otro lado, la ausencia de piedra de construcción de calidad en muchos kilómetros a la redonda, hacía casi imposible la construcción de un acueducto a nivel, que además, debía atravesar el río Ebro, de una anchura notable y un gran caudal.

Una posible solución hubiera sido la construcción de un acueducto hecho con ladrillo, pero la técnica constructiva del ladrillo, aunque conocida desde tiempo inmemorial, no fue dominada por completo, para las grandes construcciones públicas, hasta los tiempos finales de la dinastía Julio-Claudia

El puente, mucho más sencillo técnicamente que el acueducto elevado, además de servir como *venter* del sifón, cumplía pues la labor de facilitar el tránsito de personas y mercancías en dirección al Norte.

Este puente, reformado sucesivamente, aún perdura hoy día. Es el conocido como Puente de Piedra. Junto a él, entre Agosto de 1804 y Septiembre de 1805, parece ser que a causa de una extrema sequía, cerca de la cuarta arcada, se hallaron cinco tubos de plomo, que fueron reseñados en un manuscrito por D. Juan Antonio Fernández, que era en ese tiempo Archivero General de la orden de Santiago.

## Acueductos romanos de Hispania

Estos tubos eran los siguientes:

|          |       |           |
|----------|-------|-----------|
| Tubo I   | ..... | 25 palmos |
| Tubo II  | ..... | 19 palmos |
| Tubo III | ..... | 15 palmos |
| Tubo IV  | ..... | 15 palmos |
| Tubo V   | ..... | 15 palmos |

El autor del manuscrito, señala que todos los tubos estaban modulados a 15 palmos, pues el tubo I estaba formado por 1 tubo completo, un fragmento de 8 palmos y un empalme posterior, y lo mismo ocurre con el tubo II

Cabe suponer que estas medidas de palmos están referidas al medido sobre la vara de Navarra, que era la que Juan A. Fernández , nacido en Tudela, estaría acostumbrado a usar.

Teniendo en cuenta que un palmo era la cuarta parte de una vara, y que la vara de Navarra medía 0,785 m., tenemos que los tubos aparecidos junto al Puente de Piedra debían medir aproximadamente 3 metros, lo que se corresponde con 10 pies romanos. (**González Tascón I. El acueducto romano de Caesaraugusta**) lo que por otra parte concuerda con las recomendaciones de Vitruvio respecto a las longitudes de las tuberías.

El espesor, según un dibujo a escala realizado por el propio Juan A. Fernández era de 1,03 cm por lo que el peso de cada tubo sería de unos 440 Kg cada uno.

La suerte que corrieron estos tubos de plomo, es fácil de suponer, teniendo en cuenta el año en que se hallaron.

Poco después de ser encontrados, la ciudad de Zaragoza fue sometida a una serie terrible de asedios por parte de las tropas de Napoleón, llegando a ser finalmente tomada al asalto, tras una encarnizada lucha, casa por casa.

En estas condiciones, los tubos, más que probablemente, fueron fundidos para ser transformados en munición de fusilería.

El diámetro de las tuberías, según J. A. Fernández, era de "casi 2 palmos". Tomando las dimensiones del dibujo que aparece en el manuscrito, tenemos un diámetro de 36,8 cm (2 palmos de Navarra son 39,3 cm) (**González Tascón I. Op.Cit.**)

Las tuberías, vemos que tienen un diámetro verdaderamente poco común.

Esta medida es incluso superior a las que describe Frontino como máxima, la *Centenum Vicenum*, con un diámetro de unos 22,86 cm, aunque en realidad, Frontino, se refiere a las tuberías que distribuían el agua por la ciudad, y no a las que estaban instaladas en los acueductos, pues Roma no se abastecía por ningún sifón. (Lo cual no deja de ser una lástima, pues de haber sido así, nos hubiera quedado una descripción detalladísima de su uso y mantenimiento, por parte de Frontino).

Vitruvio, sí tiene en cuenta diámetros mayores de tubería. (La *centenaria* tenía un diámetro interior nominal de 58,89 cm)

- **Cálculo del caudal**

Para calcular la cantidad de agua que llegaba a Zaragoza, tendemos que hacer algunas suposiciones.

Según J. C. Abadía, el agua que abastecía al sifón era captada del Gállego en las cercanías de la actual población de Zuera (cota 273)

En la actualidad, existe una acequia, llamada del Rabal, que transcurre paralela al río Gállego hasta que tiene un brusco giro de 90º hacia el Oeste. Llega a las proximidades del Ebro a una cota excesiva, si lo que se pretende es regar las huertas, pero ideal si de lo que se trata es de transportar el agua hasta Zaragoza mediante un sifón. (*Abadía Doñaque. J.C. Algunos comentarios sobre el abastecimiento de agua a Caesaraugusta*)

Supondremos que la arqueta de cabecera del sifón se hallaba en las proximidades del lugar donde la acequia del Rabal efectúa el quiebro. (Cota 216) y que la arqueta de salida estaba en las proximidades de los restos del teatro romano (cota 200)

Tenemos por lo tanto:

- Arqueta de entrada..... 216m.
- Arqueta de salida.....204m.
- Longitud.....3.850m.
- Diámetro interior.....0,379m.

Para efectuar el cálculo del caudal, efectuaremos un procedimiento iterativo, suponiendo una velocidad, introduciéndola en la fórmula de Darcy-Weissbach, obteniendo un caudal, y posteriormente, con la ecuación general del gasto, obteniendo una nueva velocidad, más ajustada, que volveremos a introducir en la fórmula de Darcy, hasta que el valor del caudal que obtengamos en dos veces sucesivas, coincida.

Iniciamos el proceso iterativo con una velocidad obtenida de la fórmula de Mougny:

$$V = 1,5\sqrt{D + 0,05}$$

Después de dos iteraciones, obtenemos una velocidad de 1,374 m/s. lo que corresponde con un caudal de 0,153 m³/s. O lo que es lo mismo: 153 litros/s.

Este caudal lo podemos considerar como razonablemente correcto, pues si hacemos la conversión a quinarias (1 quinaria = 40 m<sup>3</sup>/día) nos sale un caudal justo de 330 quinarias.

No es pues descabellado pensar que este es el caudal proyectado por los ingenieros que diseñaron el acueducto de Zaragoza.

- **La tubería**

Una cosa que no podemos dejar de hacer es comprobar si el espesor que le dieron a la tubería era el correcto para soportar las presiones a que estaba sometida, y los márgenes de seguridad que emplearon.

Para ello, haremos el estudio (como en el caso de Toledo) de la presión que soportaba la tubería cuando estaba a plena carga.

Planteamos las ecuaciones de equilibrio:

$$2F + p_e \cdot 2R_e - p_i \cdot 2R_i = 0$$

Simplificando con las mismas condiciones que teníamos en Toledo:

$$F \approx p_i \cdot R_i$$

El esfuerzo de rotura, (E) en K/cm<sup>2</sup> lo hemos estimado en 120.

La presión interna máxima de la tubería es la que habrá entre el punto más alto y el más bajo de la canalización, que en nuestro caso es la que hay entre el lugar donde hemos supuesto la arqueta de cabecera (Cota 260) y el venter del sifón, que en nuestro caso no es otro que el "Puente de piedra" (Cota 200)

Según esto, tendremos:

$$E = \frac{F}{h} = \frac{p_i \cdot R_i}{h}$$

De donde podemos obtener, despejando y sustituyendo valores:

$$h = \frac{1,6 \cdot R_i}{120} \Rightarrow h = \frac{R_i}{75}$$

Como en nuestro caso, el radio de la tubería es de 19 cm. tenemos que en el límite de rotura, el espesor de la tubería de plomo podría ser de 0,25 cm.

## Acueductos romanos de Hispania

Como el espesor que tiene es de 1,03cm, quiere decir que los ingenieros que la diseñaron manejaban un margen de seguridad de 4, lo que está en consonancia con las observaciones que podemos hacer en otros aspectos de las instalaciones.

Si comparamos las dimensiones de este sifón con las supuestas para el de Toledo (En principio, parecen ser los dos grandes sifones de plomo que había en *Hispania*) tenemos las siguientes relaciones espesor- radio:

|          | $P_i$<br>(m.c.a.) | Diámetro<br>(m) | Diámetro<br>(romano) | Espesor/radio |
|----------|-------------------|-----------------|----------------------|---------------|
| Toledo   | 200               | 0,297           | 1pié                 | 6             |
| Zaragoza | 12                | 0,379           | 1 palmo              | 75            |

Aparentemente no hay una relación evidente entre ambos, sin embargo, lo que si parece claro es que los ingenieros romanos tenían muy clara la relación directa entre la presión de carga de la tubería y el espesor de la chapa que la conformaba. No tenían pues un espesor estandarizado de tubería, ni tan siquiera un diámetro interior normalizado, lo que indica que en cada instalación iban resolviendo los problemas a medida que se les iban planteando.

### • **La población**

Nos encontramos en terreno muy resbaladizo, pues por desgracia, desconocemos las condiciones en que se repartía el agua en la ciudad, el número de fuentes ornamentales, el consumo por habitante de la ciudad, etc. Recordemos que no está directamente relacionada la importancia de la ciudad con el consumo de agua, pues, como hemos visto, en Pompeya había un consumo por habitante y día tres veces mayor que el que había en la mismísima Urbe.

Tendremos que considerar el hecho de que cuando el acueducto se diseñó, se hizo con la idea de abastecer a una ciudad que tenía el perímetro amurallado mayor de Hispania, y que además era la punta de lanza del dominio de Roma sobre el valle del Ebro, vital para la comunicación de Roma con la zona minera del Bierzo. Por lo tanto, aunque no había una casa imperial que se abasteciera de agua, el número de patricios, nobles y oligarcas sería muy elevado.

Por otra parte, lo sobredimensionado de la tubería, nos puede indicar que el gasto por habitante se preveía elevado, es decir, que el número de baños públicos, así como el de fuentes públicas ornamentales sería grande.

En realidad, tiene sentido que Roma tratase de impresionar a la nobleza local con fuentes públicas decorativas, pues es evidente que esto sería con mucho lo más espectacular que estos habrían visto jamás.

Haremos pues las siguientes suposiciones:

1. El porcentaje de agua de boca, destinado a fuentes públicas, sería el mismo que en Roma (un 14,77%).
2. El consumo de agua de boca por habitante y día, sería de 60 litros.
3. El porcentaje de patricios en la ciudad sería aproximadamente igual al que hemos supuesto de Pompeya, Toledo, etc.

Con estas premisas, tenemos lo siguiente:

- Agua destinada a fuentes públicas.....1276,128 m<sup>3</sup>/día
- Número de habitantes (plebeyos mas esclavos)....21.269
- Número total de habitantes.....21.609

Esta sería (con todas las reservas) el máximo número de habitantes que podrían abastecerse con el sifón de Zaragoza, aunque, evidentemente, es una cifra engañosa, pues lógicamente, el sifón tendría pérdidas por fugas, desde el primer día de funcionamiento, además, desconocemos la cantidad de agua que se emplearía para riego dentro del gran perímetro de la ciudad.

Por otra parte, las incrustaciones calcáreas dentro de la tubería, harían que el caudal aportado por el sifón fuese disminuyendo progresivamente, del mismo modo que la población de la ciudad (se supone) iría aumentando, por lo que en realidad la distribución de agua variaría notablemente en poco tiempo (no hay modo de saber en realidad – a diferencia de lo que ocurre en Toledo – el tiempo en que el sifón estuvo operativo). No obstante, podemos considerar, en mi opinión, los 21.600 habitantes, como una cifra válida de referencia.